

## 科教融合研制系列化工实验教学设备

冯红艳<sup>1</sup>, 高明丽<sup>1\*</sup>, 蒋晨啸<sup>2</sup>, 吴亮<sup>2</sup>, 汪耀明<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

<sup>2</sup> 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026

**摘要:** 中国科学技术大学化学工程基础实验教学团队, 多年来践行学校科教融合的教学理念, 积极将功能膜研究室的科研成果转化为实验教学内容, 在理科化学工程实验内容设置前沿化方面开展了一定的工作。同时积极和企业合作, 定制了一系列膜分离教学仪器, 用于本科教学。

**关键词:** 化学工程基础实验; 科教融合; 教学仪器; 综合型实验; 创新型实验

**中图分类号:** G64; O6

## Integrating Science and Education to Develop a Series of Teaching Equipment for Chemical Engineering Experiments

Hongyan Feng<sup>1</sup>, Mingli Gao<sup>1,\*</sup>, Chenxiao Jiang<sup>2</sup>, Liang Wu<sup>2</sup>, Yaoming Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, China.

<sup>2</sup> School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

**Abstract:** The Chemical Engineering Basic Experiment Teaching Team at the University of Science and Technology of China (USTC) has long adhered to the university's philosophy of integrating science and education. They have actively translated the scientific research achievements of the Functional Membrane Laboratory into teaching content and made significant strides in advancing the frontier of chemistry and chemical engineering experiments. Additionally, they have collaborated with enterprises to design and develop a series of membrane separation teaching instruments for undergraduate education.

**Key Words:** Basic chemical engineering experiment; Integration of science and education; Teaching instrument; Comprehensive experiment; Innovative experiment

2015年国务院办公厅关于深化高等学校创新创业教育改革的实施意见进一步提出, 要促进教学与科研紧密结合, 推动教师把国际前沿学术成果引入到课堂教学, 科教融合成为国家培养创新型、卓越型、拔尖型人才的重要途径<sup>[1,2]</sup>。中国科学技术大学(以下简称中科大)是一所研究型大学, 隶属于中国科学院。受益于与中国科学院深厚的历史渊源, 学校拥有得天独厚的科研资源。在“全院办校, 所系结合”办学方针的指导下, 始终坚持“科教结合”的人才培养方针, 坚持科学家亲临本科教学一线的优良传统。学校在2020年发布“一流本科教育质量提升计划”行动纲领, 其中专门提出“实验实践教学作为本科教学的重要组成部分, 在人才培养过程中发挥着不可或缺的重要作用”, 鼓励科研人员将科研成果转化为实验教学内容<sup>[3]</sup>。

收稿: 2024-12-02; 录用: 2025-01-08; 网络发表: 2025-06-13

\*通讯作者, Email: gaoml@ustc.edu.cn

基金资助: 校级重点教研项目(2023xjyxm004, 2023xjyxm012, 2024xjyxm032); 省级虚拟教研室项目(2023xnjys001)

化学工程基础实验, 授课对象为我校化学相关专业高年级本科生。40学时, 1个学分, 是我校化学专业唯一一门工科基础实验课程。目前全国理科化学工程实验教学面临两大问题需要解决, 一是市场上成熟的实验设备自动化程度高, 学生没有足够的动手机会; 二是实验内容固化, 反映特色、前沿的实验内容少。而特色实验内容的开发因涉及教学设备的研制, 难度大<sup>[4,5]</sup>。

作为理工院校的化学工程基础实验, 教学理念上, 理科化学专业化工实验除了工程意识的培养, 更要让学生体会到工程中蕴含的前沿技术, 和前沿技术中亟待解决的基础研究问题。因此针对实验内容的设置的实际问题, 要加强与学术型教师的沟通。多年来我们在科教融合研制化工教学设备上形成了一定的经验, 开设了一批以膜分离为特色的化学工程基础实验项目<sup>[6-10]</sup>, 并研制了系列膜分离实验教学设备用于本科教学, 为理科化学工程基础实验教学内容建设提供了一点思路, 供同行借鉴。

## 1 科教融合, 共同开发膜分离组件系列实验

中科大功能膜研究室在膜分离领域取得了丰硕的研究成果, 多年来我们积极地将其科研成果转化为化学工程基础实验的教学内容, 引导学生接触科研前沿, 深化化工创新人才培养的深度。围绕膜分离技术的核心元件, 共同开发膜分离组件系列实验项目, 用于教学, 详见表1。膜分离组件系列实验类型可以开设为基础型实验, 4-6实验学时。从2013年开始开设膜组件组装实验, 特别是在板式组件组装实验上已经积累了非常丰富的经验。膜分离组件系列实验的内容均来源于团队教师的最新科研成果或应用(见表1, 教学内容参考来源一栏<sup>[11-16]</sup>)。例如, 离子精馏技术相关的科研成果于2022年4月发表, 2023年秋季就开始用于本科教学。多年来深度践行学校科教融合的教学理念, 使我们在科研发现和教学内容转化上形成非常默契的同步。

表1 膜分离组件系列实验开发及应用

序号	教学实验名称	教学应用	教学内容参考来源(功能膜研究室科研成果)
1	扩散渗析膜组 装实验	2013年开始用 于本科教学	A quantification of diffusion dialysis process: Single electrolyte system (sodium chloride solution). <i>Separation and Purification Technology</i> <b>2013</b> , <i>104</i> , 45 <sup>[11]</sup>
2	电渗析膜组 装实验	2014年开始用 于科普活动	Phosphate recovery from excess sludge by conventional electro dialysis (CED) and electro dialysis with bipolar membranes (EDBM). <i>Industrial &amp; Engineering Chemistry Research</i> <b>2013</b> , <i>52</i> , 15896 <sup>[12]</sup>
3	双极膜电渗 析膜组 装实验	2014年开始用 于本科教学	In-situ combination of fermentation and electro dialysis with bipolar membranes for the production of lactic acid: continuous operation. <i>Bioresource Technology</i> <b>2013</b> , <i>147</i> , 442 <sup>[13]</sup>
4	卷式扩散渗 析回收钛白 废酸	2015年开始用 于本科教学	Diffusion dialysis of sulfuric acid in spiral wound membrane modules: effect of module number and connection mode. <i>Separation and Purification Technology</i> <b>2015</b> , <i>148</i> , 25 <sup>[14]</sup>
5	反向电渗析 组 装实验	2017年开始用 于科普活动	Storable Hydrogen Production by Reverse Electro- Electro dialysis (REED). <i>Journal of Membrane Science</i> <b>2017</b> , <i>544</i> , 397 <sup>[15]</sup>
6	离子精馏膜 组 件组 装实验	2023年开始用 于本科教学	Ion-“distillation” for isolating lithium from lake brine. <i>AIChE Journal</i> <b>2022</b> , <i>68</i> , e17710 <sup>[16]</sup>

离子精馏是一种有别于传统电渗析过程的新型电驱动膜分离技术, 由功能膜研究室于2022年原创性提出并首次应用于高镁锂比盐湖提锂<sup>[16]</sup>。我国锂资源丰富, 主要分布在青藏高原的盐湖卤水中, 其普遍特点是高镁锂比。由于锂镁具有非常相似的性质及水合半径, 卤水中镁锂比越高, 提锂难度

越大。当前我国提锂资源主要依靠进口，易受国外制约。因此离子精馏技术具有非常重要的经济价值和战略意义。

离子精馏膜组件为板式组件，其组件内部结构的创新，见图1。其内部结构不同于普通的电渗析，采用了同类同侧的排列方式。实验中学生自己组装完成该板式组件组装，打开膜组件内部结构的黑盒子，对于理解离子精馏原理非常有用。同时教学实验中的一二价阴膜选用的是日本AGC@CSO膜，一二价离子选择膜分离性能的研究国内还处于需要突破的阶段<sup>[17-19]</sup>。离子精馏技术以及该技术中亟待解决的基础研究问题，都有必要向本科生渗透。该实验内容的开展，可以让学生在了解离子精馏技术的基础上，及早发现前沿技术中需要解决的一二价离子膜性能突破的基础研究问题，这对理科学院校化学专业学生的化学工程基础实验的教学非常必要。

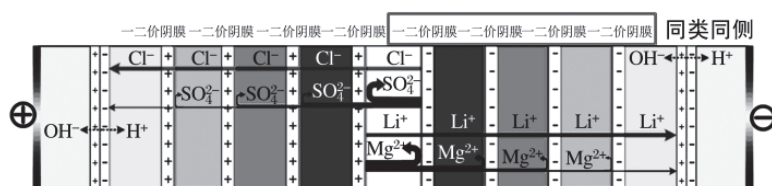


图1 离子精馏组件原理示意图

## 2 仪器大小并用，开设系列膜分离综合(探究)实验

将“膜分离组件系列组装实验”转化为本科生实验教学内容，极大地丰富了实验内容，拓宽了实验教学范围和视野。同时该部分实验内容大多采用的是板式膜组件，这种组件类型最为简单，也最为易得，一般采用购买或定制购买的方式获得。学生通过自组装的实验方式，一方面提高了动手和实践能力，一方面打开了仪器内部的黑盒子，对于原理的掌握更为直接有效。这部分实验内容的仪器规模比较小，可以在实验台面上完成。作为一种应用前景广泛的分离技术，便于在无机化学实验、分析化学实验、有机化学实验、材料化学实验等学科专业实验中进行推广开设。

对于化学工程基础实验教学来说，为了实现工程意识的培养，需要兼顾大型仪器设备来完成教学。因此在具体教学安排上，可以拓展成仪器和组件并用的综合实验，详见表2。也可以根据实际需要在教学安排上设计成探究型实验。例如，卷式扩散渗析实验教学内容，来源于2016年结题的国家基金面上项目“卷式扩散渗析膜组件的优化设计 and 应用基础研究”，2015年秋季就用于本科教学。在教学内容安排上，综合实验开设板式组件组装实验和卷式扩散渗析回收钛白废酸实验。回收废酸实验具体是改变废酸和水在组件中流动方向，验证不同流动方向对酸回收效果的影响。实际也可以安排学生探究不同的流动速度、不同组件面积、不同的组件串并方式对酸回收效果的影响。也就是说只把科研发现中的一个条件作为实验内容开设，可以设计成综合实验；多个条件作为实验内容开设，就可以设计成探究实验。“科教融合”型实验是由成熟的科研实验通过提炼转化而来，具有高阶性、前瞻性、挑战性等特点。一定程度解决了目前理科化工实验教学中的实验内容固化，特色前沿的实验内容少的问题。

## 3 与企业合作，定制膜分离教学实验设备

特色化学工程基础实验内容的开设，需要配套开发教学仪器。多年来我们在科教融合研制系列化工实验教学设备方面也做了一些积极的工作，详见表2(设备型号和来源一栏)。针对目前还不成熟的膜分离教学设备市场，结合自身的需求，和其他单位合作开发。科研仪器到教学仪器的定制，满足教学内容的具体需求，同时避免了手工制作的简陋与低效率，改进后的设备兼具美观和便于操作讲解，操作安全性也大大提高，更适合于实验教学和科研使用(图2-图5)。图3为功能膜研究室和合肥科佳高分子材料科技有限公司合作开发的“卷式扩散渗析组件”。图5为和安徽中科莘阳膜科技有限

公司合作开发的“离子精馏分离锂镁实验设备”。定制加工的成套教学设备还有“纳滤设备组装实验装置”(图6)和“反向电渗析装置(图7)”。

和企业合作开发使得教学仪器的设计和快速生产成为可能,使得从“书架”到“货架”再到“书架”成为可能:(1)膜分离实验教学内容来源于科研平台(<http://membrane.ustc.edu.cn/>中科大功能膜研究室),书架;(2)与膜科技有限公司合作,为教学仪器开发提供可能(如中科大联合成立的膜技术公司,<http://www.ahzksy.cn/>),货架;(3)中科大化学工程实验教学平台(<https://chemenglab.ustc.edu.cn/>),以课程为载体,科研成果转化为教学内容,书架。

表2 膜分离综合实验设计

序号	教学实验名称	教学内容安排	设备型号及来源
1	压力驱动膜分离实验	(1) 超滤膜组件组装实验(二选一) (2) 纳滤设备组装实验(二选一) (3) 纳滤法分离糖和盐的水溶液(二选一) (4) 反渗透组合工艺制备超纯水(二选一)	压力驱动膜分离教学设备市场成熟,设备多为直接采购成型设备:(1) 端板SY-MU-2010,膜包自制;(2) CJ-NF-1812,中科莘阳定制;(3) pl-d3-4040,普朗膜设备;(4) SJM-RO-42,世杰膜设备
2	扩散渗析实验	(1) 扩散渗析膜组装实验 (2) 卷式扩散渗析回收钛白废酸	(1) 端板SY-MU-2050,膜包自制 (2) cj-swdd-002,科佳定制
3	电渗析实验	(1) 电渗析膜组装实验 (2) 电渗析脱除水中的无机盐实验	(1) 电极板和电渗析膜包,科佳定制 (2) cj-ed-01,科佳定制
4	双极膜电渗析实验	(1) 双极膜电渗析膜组装实验 (2) 双极膜电渗析同时产酸产碱实验	(1) 电极板和双极膜电渗析膜包,科佳定制 (2) cj-ed-01,科佳定制
5	离子精馏实验	(1) 离子精馏膜组件组装实验 (2) 离子精馏盐湖提锂	(1) 电极板和离子精馏膜包,科佳定制 (2) ID-C-1020S4R5,中科莘阳定制
6	反向电渗析实验	(1) 反向电渗析组装实验 (2) 反向电渗析产氢实验	(1) 端板和反向电渗析模板 (2) SYRED-1020-40,中科莘阳定制



图2 卷式扩散渗析组件(科研)



图3 卷式扩散渗析组件(定制)



图4 离子精馏实验设备(科研)



图5 离子精馏实验教学设备(定制)



图6 纳滤组装实验教学装置(定制)



图7 反向电渗析教学设备(定制)

化学工程基础实验教学实践中,在实验教学内容安排上兼顾三传一反(即动量传递、热量传递、质量传递和化学反应过程)的传统化工实验内容的同时,再选择2-3个膜分离实验进行开设。将膜分离特色实验内容和传统化学工程基础实验内容进行整合,形成了更合理理院校开设的实验内容,打破理院校化学工程基础实验教学内容跟着工院校走的瓶颈。

作为理院校的化工实验很难也没有必要做到实验仪器的大型化,但是却可以通过教学和科研工作有机结合,形成具有特色又紧跟学科前沿的实验内容和教学仪器。希望可以为理院校化学工程基础实验教学提供参考:(1)选择合适的科研项目分离体系,用于实验教学,保证实验内容紧跟科研前沿。(2)和科研实验室合作,在科研仪器现有制备工艺基础上,设计适合本科教学实验的仪器;(3)通过企业合作,实现实验教学仪器的自主设计生产。膜分离相关教学设备和内容除了适合在化学专业开设,面向环境、生物专业、能源等专业也非常适合推广开设。

### 参 考 文 献

- [1] 教育部高等学校教学指导委员会. 普通高等学校本科专业类教学质量国家标准. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [2] 张树永, 朱亚先. 中国大学教学, **2018**, No. 7, 55.
- [3] 程洁, 吴强. 教育装备论坛, **2023**, No. 6, 112.
- [4] 冯红艳, 傅延勋, 杨伟华, 徐铜文. 化学工程实验. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
- [5] 北京大学, 南京大学, 南开大学. 化工基础实验. 北京: 北京大学出版社, 2004.
- [6] 高明丽, 冯红艳, 蒋晨啸, 纪文根, 徐婷婷, 王钰熙. 大学化学, **2018**, 33 (9), 82.
- [7] 冯红艳, 徐铜文, 杨伟华, 高明丽. 化工高等教育, **2017**, 34 (6), 59.
- [8] 冯红艳, 徐铜文, 高明丽. 大学化学, **2016**, 31 (11), 56.
- [9] 冯红艳, 徐铜文, 王晓林, 杨伟华. 大学化学, **2015**, 30 (1), 59.
- [10] 冯红艳, 杨伟华, 徐铜文. 化工高等教育, **2014**, No. 1, 67.
- [11] Zhang, X.; Wang, X. L.; Li, C. R.; Feng, H. Y.; Wang, Y. M.; Luo, J. Y.; Xu, T. W. *Sep. Purif. Technol.* **2013**, 104, 45.
- [12] Wang, X. L.; Wang, Y. M.; Zhang, X.; Feng, H. Y.; Li, C. R.; Xu, T. W. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, 52 (45), 15896.
- [13] Wang, X. L.; Wang, Y. M.; Zhang, X.; Feng, H. Y.; Xu, T. W. *Bioresource Technol.* **2013**, 147, 442.
- [14] Luo, F. B.; Zhang, X.; Pan, J. F.; Mondal, A. N.; Feng, H. Y.; Xu, T. W. *Sep. Purif. Technol.* **2015**, 148, 25.
- [15] Chen, X.; Jiang, C. X.; Zhang, Y. L.; Wang, Y. M.; Xu, T. W. *J. Membr. Sci.* **2017**, 544, 397.
- [16] Jiang, C. X.; Chen, B. L.; Xu, Z.; Li, X. Y.; Wang, Y. M.; Ge, L.; Xu, T. W. *AIChE J.* **2022**, 68, e17710.
- [17] Golubenko, D. V.; Manin, A. D.; Wang, Y. M.; Xu, T. W.; Yaroslavtsev, A. B. *Desalination* **2022**, 531, 115719.
- [18] 杨宏欣, 李兴亚, 葛亮, 徐铜文. 化工学报, **2022**, 73 (8), 3739.
- [19] Ge, L.; Wu, L.; Wu, B.; Wang, G. H.; Xu, T. W. *J. Membr. Sci.* **2014**, 459, 217.